

УДК 621.88.088 (045)

О. В. Тісов

Національний університет України, м. Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ КОБАЛЬТУ

В роботі розглянуто основні процеси, що відбуваються на поверхнях тертя композиційних сплавів на основі кобальту (ливарних і порошкових) в умовах високотемпературного віброконтактного навантаження.

Ключові слова: кобальтовий сплав, порошкова металургія, карбід титану, карбід ніобію, тертя та зношування.

Актуальність дослідження

В процесі підвищення надійності і ресурсу газотурбінних двигунів (ГТД) однією з найбільш важливих задач є забезпечення високої зносостійкості контактних поверхонь бандажних полиць робочих лопаток турбіни [1, 2]. Особливо гостро це питання стало при створенні ГТД нового покоління, де поряд із збільшенням ресурсу ставилась задача підвищення потужності на одиницю маси двигуна, що, відповідно, призвело до збільшення робочих температур і діючих навантажень. З огляду на перспективи розвитку і вимоги, що ставляться до сучасних авіаційних ГТД, така тенденція зберігатиметься й надалі.

В роботах [3, 4] показано, що ефективним методом підвищення зносостійкості бандажних полиць може бути напаявання композиційного порошкового сплаву П-76. Для його застосування і подальшого поліпшення необхідно виділити та вивчити основні процеси, що призводять до його руйнування в умовах високотемпературного віброконтактного навантаження.

Метою даної роботи є дослідження процесів зношування і поверхневого руйнування евтектичних і порошкових сплавів на основі кобальту.

Матеріали і методика дослідження

Ливарні композиційні сплави виготовлялись шляхом електродугової плавки шихтованих заготовок. Плавлення проводилось в інертній атмосфері аргону за допомогою вольфрамового електроду. Для досягнення рівномірності розподілу елементів у сплаві проводили чотирикратне

переплавлення з перевертанням відливків.

Зразки порошкових сплавів для дослідження виготовляли методом порошкової металургії, що включав розмелення порошкових сумішей в планетарному млині й активоване спікання при гарячому пресуванні. Для виготовлення пресованих зразків використовувались порошки кобальту, хрому, алюмінію, заліза та карбиду титану. Склад досліджених сплавів наведено в табл. 1.

Для оцінки зносостійкості даних сплавів використовувалась установка МФК-1, додатково обладнана кільцевою електричною піччю для імітації умов високотемпературного віброконтактного навантаження. [5] Використання нагрівального елемента, виготовленого зі сплаву Resistohm-145, дозволило підняти максимальну робочу температуру до 1050 °С. Випробування проводились в однойменних парах при наступних умовах: питоме контактне навантаження – $P = 30$ МПа; амплітуда відносного переміщення зразків – $A = 120$ мкм; частота коливань – 30 Гц; база випробувань – $5 \cdot 10^6$ цикл.; температура оточуючого середовища – 650–1050 °С.

Результати проведених досліджень показали (рис. 1), що при температурі 650 °С сплав П-76 перевищує за зносостійкістю сплав П-69 в 1,6 раза, а сплав ХТН-62 – в 15 разів. При температурі 800 °С спостерігається зростання інтенсивності зношування сплаву П-76 в 2 рази, сплаву П-69 – в 3,6 рази, а сплаву ХТН-62 в 4 рази порівняно з температурою 650 °С. При температурі 1050 °С випробувано матеріали П-69 і П-76, знос порошкового сплаву в 1,6 раза менший за знос ливарного.

Таблиця 1 – Склад композиційних сплавів

№	Марка	Co	TiC %, об/мас	NbC %, об/мас	Cr %, мас	Al %, мас	Fe %, мас	W %, мас	Пористість, %
1	ХТН-62	48,25	0	19/17,25	20	2	3	9,5	0 (ливарний)
2	П-69	55,5	30/19	0	19,6	2,95	2,95	0	0 (ливарний)
3	П-76	43,83	50/36	0	15,5	2,33	2,33	0	3,1

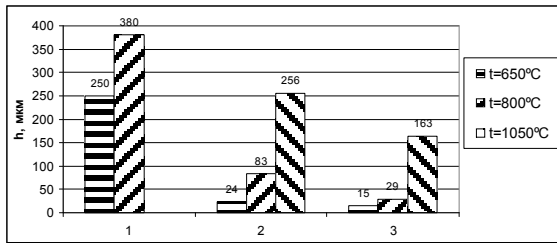


Рис. 1. Зношування композиційних сплавів на основі кобальту в умовах високотемпературного віброконтактного навантаження: 1 – сплав ХТН-62, 2 – сплав П-69, 3 – сплав П-76

Сплав ХТН-62 інтенсивно зношується на всьому температурному проміжку. Аналіз стану поверхні тертя, а також – стан підповерхневих шарів (рис. 2) дозволяє зробити висновок про руйнування внаслідок пластичного деформування. Таким чином, в результаті дії зовнішнього циклічного навантаження в матеріалі виникають знаменні напруження, що призводять при високих температурах до утворення деформаційного рель'єфу у вигляді напливів металу.

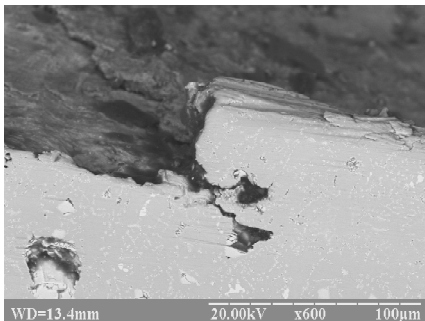


Рис. 2. Деформаційна структура сплаву ХТН-62, пластичні деформації і подібнення карбідних кристалів, $\times 2500$

Внаслідок значних пластичних деформацій, утворена в результаті фрикційної високотемпературної взаємодії захисна оксидна структура відділяється від механічно нестійкого підповерхневого шару матеріалу. Таке сколювання, швидше за все, відбувається на ділянках фактичного контакту, що сприяє процесам відкривання ювенільних ділянок металу і схоплюванню. Крім того, поверхні таких сколів мають підвищену дефектність кристалічної ґратки, що сприяє їх активному окисленню. Високу інтенсивність поверхневого деформування можна пояснити низьким вмістом карбиду ніобію в сплаві, а також – його низькою жаростійкістю при температурах вище 800 °С [6].

В результаті заміни карбиду ніобію на карбід титану збільшилися міцність і жаростійкість наповнювача. Збільшення також і кількості карбідної фази у ливарному сплаві П-69 до 30 % об. дозволило значно зменшити інтенсивність дефор-

маційних процесів на поверхнях тертя. Аналіз мікроструктури поверхневого шару евтектичного сплаву на основі кобальту П-69 дає підстави вважати, що такої його кількості недостатньо, щоб запобігти деформуванню поверхневого шару, тому руйнування поверхонь цього матеріалу внаслідок пластичного деформування в умовах віброконтактного навантаження достатньо виражене. Типова деформаційна структура поверхневого шару під «доріжкою» тертя сплаву П-69 зображено на рис. 3. Витягнутість карбідів і їх щільне прилягання один до одного в умовах деформування призводить до руйнування й дроблення видовжених зерен. В результаті цього зміцнююча фаза викришується, утворюючи порожнини в металі.

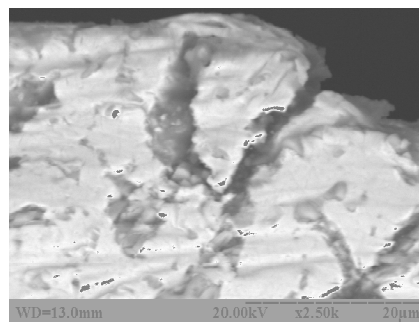


Рис. 3. Деформаційна структура поверхневого шару сплаву П-69 – руйнування карбідних зерен, $\times 2500$

Супутнім процесом, пов'язаним з поверхневим деформуванням, є викришування крупних карбідних зерен з поверхні тертя. Такі зерна, з розміром 10...40 мкм. при певних умовах зовнішнього знаменного динамічного навантаження можуть відігравати роль абразивних частинок. Однак, дослідження поверхонь тертя показало, що характерних пошкоджень немає. Можна припустити, що тріщини в крупних карбідних зернах, а також – руйнування витягнутих дрібних призводить до відокремлення невеликих кристалів, розмір яких недостатній для пошкодження поверхні тертя.

Аналізуючи вищевикладений матеріал, можна вивести феноменологічну схему зношування евтектичних сплавів на основі кобальту в умовах високотемпературного віброконтактного навантаження:

1. На початковому етапі відбувається утворення тонких оксидних плівок, руйнування мікроступів поверхні. З підвищенням температури дані процеси пришвидшуються. В мікрорідинках поверхні накопичуються продукти зношування, що разом із досягненням рівноважної шорсткості завершує процес припрацювання і стабілізує зношування.

2. Внаслідок прикладання знаменних навантажень відбувається початкове накопичення

втомного пошкодження, поява незначних за площею і розміром деформованих ділянок.

3. Текучість поверхневого шару призводить до деформацій поверхні, видавлювання матеріалу із найбільш навантажених ділянок фактичного контакту, подрібнення і викришування карбідних фаз, що супроводжується їх окисленням, призводить до злущування захисних оксидних шарів, які сприймають і компенсують напруження, викликані дією сил тертя.

4. Внаслідок великої дефектності поверхонь сколів, частинок відокремленого і деформованого металу відбувається інтенсифікація процесів окислення, порушується рівновага між утворенням і руйнуванням захисних поверхневих шарів.

Заміна карбіду ніобію карбідом титану дозволило покращити властивості кобальту, про що свідчать результати попередньо наведених досліджень.

Тривалі випробування в умовах високотемпературного віброконтактного навантаження показали, що сплав П-76 має найвищу зносостійкість. Аналіз стану поверхні тертя і підповерхневого шару показав суттєву різницю в механізмі руйнування спряжених поверхонь. На рис. 4 представлена топографія «доріжки тертя» сплаву при температурі 1050 °С.

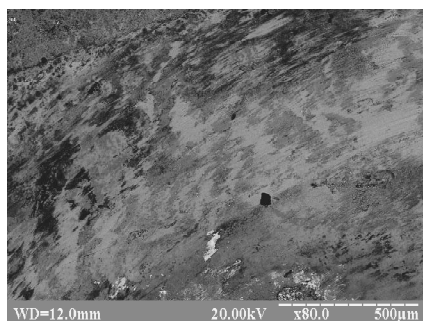


Рис. 4. Топографія поверхні тертя сплаву П-76, $t = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\times 80$

В усьому діапазоні температур випробувань структура поверхні є рівномірною. Характерним для нього, як і для всіх порошкових сплавів при високій температурі є формування стійкого шару оксидів матриці, які в своєму складі можуть мати до 46 % мас. хрому (світлі ділянки). Їх поверхня частково покрита оксидами титану (темні ділянки). Утворення оксидів титану і їх намашування на більш твердий підшар можна вважати ще одним підтвердженням того, що карбідні зерна розташовуються на ділянках безпосереднього контакту двох спряжених поверхонь. Утворені на поверхні карбідних зерен шари твердого розчину $\text{TiC}+\text{TiO}$ менш тверді за основу і в процесі тертя злущуються, їх невелика товщина призводить до утворення дрібнодисперсних порошків

TiO_2 . Спільна дія високого навантаження і температури сприяє їх припіканню до основи, забезпечує їх когезію. Таким чином утворюється градієнтний поверхневий шар, який відповідає правилу позитивного градієнта. Схематично цей процес показано на рис. 5, а, б, в.

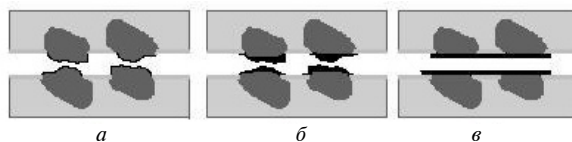


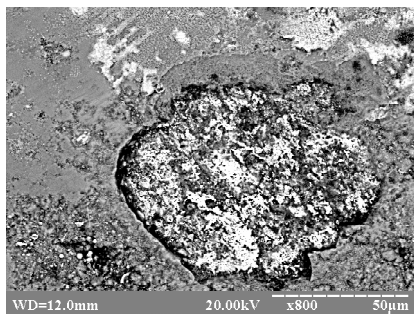
Рис. 5. Схема утворення оксидного шару при високих температурах: а – вихід карбідів на ділянки фактичного контакту, утворення тонких оксидних плівок, б – подальше окислення карбіду титану і початок його зношування, в – зношування оксидного шару на поверхні TiC і його намашування на поверхню тертя, формування градієнтного оксидного шару

Слід зазначити, що розмір темних ділянок (їх розмір в напрямку, паралельному напрямку тертя досягає 200–300 мкм, що приблизно дорівнює подвійній амплітуді проковзування контртіла по зразку – 240 мкм) значно перевищує площу виходу на поверхню тертя одиничного карбідного зерна. Можна припустити, що розміри і форма темних ділянок відповідають контурній площі фрикційної взаємодії [7].

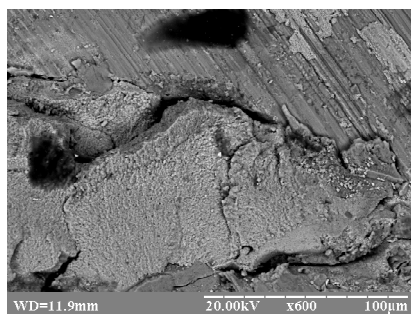
Таким чином, оксиди титану, потрапляючи на твердий підшар відіграють роль мастила, пом'якшуючи фрикційну взаємодію спряжених поверхонь і сприяють стабілізації процесу тертя.

Аналіз окремих ділянок «доріжки тертя» сплаву П-76 показав зколювання достатньо великих за розміром ділянок захисного оксидного шару – 40–100 мкм (рис. 6, а). Дрібнодисперсні частинки зношеного матеріалу накопичуються на ділянках, вільних від тертя. Такими ділянками, очевидно, і є місця сколювання, так як вони нижчі за сусідні ділянки поверхні. Відсутність оксидів зумовлює їх високу адгезійну здатність, що сприяє закріпленню продуктів зношування і утворенню нової трибоструктури. Результат такого процесу зображено на рис. 6, б.

Вище наведений аналіз показує, що оксидний шар суцільно покриває поверхню тертя і ефективно захищає її від зношування. Однак, попередньо проаналізований сплав ХТН-62 також формує оксидний шар, але він швидко руйнується внаслідок пластичного деформування металевої основи. Така різниця в характері зношування і зносостійкості полягає в суттєвій відмінності в структурі сплавів. На рис. 7 зображено структуру сплаву П-76 під доріжкою тертя. Видно, що взаємне розташування зміцнюючої фази мало відрізняється від вихідної мікроструктури, що може свідчити про відсутність пластичного деформування поверхневого шару.



а



б

Рис. 6. Зношування сплаву П-76. Топографія поверхні тертя ($t = 1050 \text{ }^\circ\text{C}$): а – відшарування оксидної плівки; б – замащування місця сколу продуктами зношування

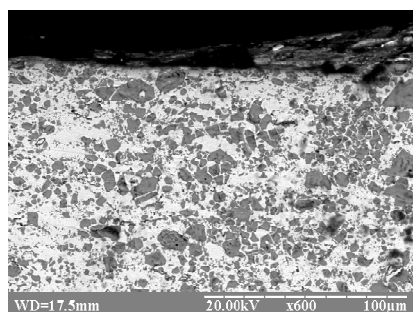


Рис. 7. Мікроструктура сплаву П-76 під «доріжкою тертя» після випробувань при $t = 1050 \text{ }^\circ\text{C}$

Матрична фаза щільно прилягає до зерен TiC , відсутні тріщини. Відсутнє також викришування карбідної фази з поверхні тертя, що, з однієї сторони, говорить про її міцне зчеплення з матричною фазою, оптимальну передачу напружень від сил тертя всередину матеріалу, з іншої – про переважно механо-хімічний механізм зношування. Відсутність деформованого підповерхневого шару говорить про локалізацію напружень, в тонкому поверхневому шарі. В роботі [7] говориться про можливість відсутності пластичного деформування і фрагментації поверхневого шару металу; зношування відбувається переважно внаслідок руйнування оксидних шарів. Такий характер взаємодії можливий при достатньо низьких навантаженнях. Очевидно, що такі навантаження практично не викликають в матеріалі напружень, що перевищують межу текучості. Таким чином, можна стверджувати, що при вдалому підборі складу

композиційного сплаву, що забезпечить релаксацію напружень і обмеження взаємодії в пружній області, навантаження, при яких буде відбуватись переважно механо-хімічне зношування, можна збільшити.

Викладений аналіз дозволяє виділити певні процеси на поверхні тертя композиційних порошкових сплавів з високим вмістом наповнювача і запропонувати наступну феноменологічну схему їх зношування в умовах високотемпературного віброконтактного навантаження:

1. В початковий період припрацювання відбувається формування захисного оксидного шару, зношування матричної фази і вихід зерен карбідів на ділянки фактичного контакту.

2. Зерна карбиду титану насичуються киснем, таким чином формується бар'єр для подальшої його абсорбції, з іншої – зниження твердості їх поверхні, що сприяє зменшенню інтенсивності зношування.

3. Зростання температури призводить до інтенсифікації процесів окислення. При $t > 900 \text{ }^\circ\text{C}$ формується шар оксидів з підвищеним вмістом хрому. Зношування зерен карбиду титану сприяє намащуванню більш м'якого оксидного шару поверх твердого. Таким чином, TiO_2 відіграє роль твердого мастила.

4. При тривалому контактному-силовому впливі відбувається руйнування захисного оксидного шару, намашені продукти зношування, будучи більш м'якими, не можуть в повній мірі протидіяти зовнішньому температурно-силовому впливу, порушуються процеси відновлення оксидних плівок, що призводить до збільшення інтенсивності зношування.

Висока зносостійкість утворених в процесі високотемпературної віброконтактної взаємодії поверхневих структур та їх міцність забезпечуються структурною стабільністю і протидією пластичним деформаціям основного матеріалу завдяки оптимальному вмісту зносостійкого жаростійкого наповнювача.

Високі контактні навантаження локалізуються в поверхневих вторинних структурах і напруження, що передаються на нижчі шари, викликають в них переважно пружні деформації, що підтверджується металографічним аналізом. Обмеження пластичних деформацій і високотемпературної текучості шляхом введення в матрицю 50 % об. карбиду титану є важливою передумовою для застосування даного сплаву в вузлах тертя, що додатково навантажені високою температурою.

Висновки

На основі аналізу процесів, що відбуваються на поверхнях тертя розглянутих композиційних сплавів на основі кобальту (ливарних і порош-

кових) запропоновано феноменологічні схеми їх високотемпературного зношування в умовах високотемпературного віброконтактного навантаження.

Високі трибологічні характеристики сплаву П-76 підтверджено випробуваннями в широкому діапазоні температур (від кімнатних до 1373 К). Він володіє високою зносостійкістю, що робить його перспективним в якості матеріалу для нанесення на контактні поверхні бандажних полиць робочих лопаток турбін ГТД.

Список літератури

1. Контактное взаимодействие сопряженных деталей ГТД / [В. А. Богуслаев, Л. И. Ивченко, А. Я. Качан, В. Ф. Мозговой]. – Издат. комплекс ОАО «Мотор Сич». – 2009. – 328 с.
2. Ивченко Л. И. изнашивание жаропрочных материалов при вибрациях / [Л. И. Ивченко, А. Я. Качан] // Вестник двигателестроения. – 2008. – № 2. – С. 160–163.
3. Композиційні сплави для зміцнення контактних поверхонь бандажних полиць робочих

лопаток газотурбінних двигунів / [М. В. Кіндрачук, О. І. Духота, Т. С. Черепова, О. В. Тісов] // Проблеми трибології. – 2010. – №4. – С. 101–104.

4. Кіндрачук М. В. Зносостійкі та жароміцні сплави на основі кобальту/ [М. В. Кіндрачук, О. В. Тісов] // Наукоємні технології. – К. : Вид-во нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк». – 2010. – № 2. – С. 26–29.
5. Духота О. І. Дослідження зносостійкості жароміцних композиційних сплавів в умовах високотемпературного фретингу / [О. І. Духота, О. В. Тісов] // Проблеми тертя та зношування. – К. : НАУ – 2010. – № 53. – С. 195–200.
6. Войтович Р.Ф. Окисление карбидов и нитридов. – К. : Наукова думка, 1981. – 191 с.
7. Гарбар И. И. О структуре и строении поверхностных слоев сопряженных материалов трущихся пар. / И. И. Гарбар // Трение и износ. – 1990. – Т. 11. – № 4. – С. 581–593.

Поступила в редакцию 28.09.2011

Тисов А.В. Исследование износостойкости композиционных сплавов на основе кобальта

В работе рассмотрены основные процессы, протекающие на поверхностях трения композиционных сплавов на основе кобальта (литейных и порошковых) в условиях высокотемпературного виброконтактного нагружения.

Ключевые слова: кобальтовый сплав, порошковая металлургия, карбид титана, карбид ниобия, трение и износ.

Tisov O. Investigation of wear resistance of composite cobalt based alloys

Current work investigates main phenomena, which take place on friction surfaces of composite cobalt based alloys (cast and powder) in conditions of high temperature vibration loading.

Key words: cobalt based alloy, powder metallurgy, titanium carbide, niobium carbide, friction and wear.